

**Contractor: Institutul National de Cercetare-Dezvoltare
pentru Fizica Pamantului**

Cod fiscal : **5495458**

(anexa la procesul verbal de avizare interna nr.)

**De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. Ing. Constantin Ionescu
Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Prof. Dr. Mircea Radulian**

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 31N/2019

Proiectul: PN 19080102: Cercetari avansate privind factorii care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei in contextul interactiunii multiple litosfera, hidrosfera, atmosfera, ionosfera.

Faza 1: Estimarea deformatiilor in camp apropiat si indepartat si a efectelor la suprafata ale propagarii undelor seismice

Termen: 8.03.2019

1. Obiectivul proiectului:

Proiectul „**Cercetări avansate privind evaluarea hazardului și riscului seismic în vederea creșterii rezilienței la cutremure. Provocari în înțelegerea dinamicii Pamantului**” propune o investigație multidisciplinară, complexă și intercorelată a fenomenelor care au loc în sistemul cuplat Litosfera-Hidrosfera-Atmosfera-Ionosfera, pentru modelarea fenomenelor tectonice și a proceselor seismice și identificarea relației spatio-temporale dintre structura geologică, tensiunile crustale, potențialul seismogen, în scopul descifrării conexiunilor complexe dintre fenomenele tectonice și efectele lor asupra câmpurilor geofizice măsurabile la suprafața Pamantului. Proiectul urmărește totodată și modelele de propagare ale undelor seismice și estimarea efectelor acestora la suprafața Pamantului, prin calcularea/măsurarea deformatiilor și deplasărilor crustei și a interacțiunii sol-structuri construite în scopul evaluării hazardului și reducerii riscului la cutremur, dar și a altor fenomene secundare asociate acestuia (tsunami). Acest proiect va aborda fenomenul seismic în interconexiune cu fenomenele generate de sistemele litosfera, hidrosfera, atmosfera și ionosfera în scopul diminuării riscului, ținând cont de noile metode și procedee aplicabile la aceste sisteme cuplate, încercând să răspundă provocărilor complexe de natură științifică și practică pe care dinamica Pamantului le ridică, în vederea creșterii rezilienței la cutremure.

Proiectul este structurat pe doua directii mari: „D1. Cercetari avansate privind factorii care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei” si „D2. Cercetari complexe ale interactiunii litosfera, hidrosfera, atmosfera, ionosfera”, ce fac parte integranta din obiectivul major „Cercetări avansate privind evaluarea hazardului și riscului seismic în vederea creșterii rezilienței la cutremure. Provocari in intelegerea dinamicii Pamantului”, al Strategiei de dezvoltare a Institutului National de CD pentru Fizica Pamantului (INCDFP).

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului: dezvoltarea cercetarilor avansate privind evaluarea cu metode specific seismologice, geotehnice, fizice si matematice a factorilor care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei pentru a asigura cresterea rezilientei societatii umane la cutremure. Se vor dezvolta modele de propagare ale undelor seismice si estima efectele acestora la suprafata Pamantului prin calcularea/masurarea deformatiilor si deplasarilor crustei si a interactiunii sol-structuri construite, in scopul evaluarii hazardului si reducerii riscului la cutremur, dar si a altor fenomene secundare asociate acestuia (tsunami). Din analiza înregistrărilor de mișcări puternice ale cutremurelor vrâncene de magnitudine moderată și mare se va investiga variabilitatea observata în distribuțiile spațiale ale mișcării seismice a terenului. Se va implementa o noua metodologie prin abordari noi de evaluare a hazardului seismic folosind factorii neliniari de amplificare spectrală, în funcție de magnitudinea cutremurului și de condițiile locale ale amplasamentului seismic. Se vor realiza hărți de expunere și vulnerabilitate seismică, precum și cu estimări de pagube pentru scenarii seismice reprezentative. Îmbunătățirea capabilităților de estimare a pagubelor directe și indirecte generate de cutremure în România se va realiza in tip aproape real și pentru scenarii reprezentative. Calculul parametrilor sursei tip falie, estimarea activitatii seismice se vor realiza prin parametrizari stohastice a evenimentelor seismice cu implementarea de tehnici TMS (timp, magnitudine, spatiu). Identificarea și ierarhizarea parametrilor de interes ingineresc se va face în funcție de gradul influenței seismului asupra integrității clădirii. Se vor propune norme metodologice coerente de monitorizare a stării de sănătate și integritate a construcțiilor. De asemenea se are in vedere dezvoltarea cercetarilor complexe privind interactiunile multiple din sistemul complex litosfera, hidrosfera, atmosfera, ionosfera in scopul identificarii corelatiilor între fenomenele ce au loc in focarul cutremurelor de Pamant si semnaturile acestor fenomene la suprafata Pamantului, in Atmosfera si in stratele inferioare ale ionosferei. Se vor realiza analize multiparametrice si multi statie a campurilor geofizice cu potential precursor seismic avandu-se in vedere standardizarea datelor in vederea asigurarii calitatii. Printre rezultatele cercetarilor se vor regasi si harti geologice si harti geo-tectonice pentru zonele studiate, harti macroseismice pentru cutremurele recente cu $M > 5.0$ si microzonarea in intensitati a unor orase din zona extracarpatica.
3. Obiectivul fazei: Estimarea deformatiilor in cimp apropiat si indepartat si a efectelor la suprafata ale propagarii undelor seismice.
4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei: -Re-formularea sursei seismice utilizand natura sa localizata si simetria tensorului moment seismic; Estimarea deformatiilor in cimp apropiat si indepartat produse de undele seismice provenite din astfel de surse precum si deplasarea cauzata de o forta localizata ce actioneaza pe

suprafata;-Evaluarea deplasarilor pentru unde provenite din surse seismice de tip falie orizontala si verticala.

5. Rezumatul fazei (maxim 5 pagini):

1.Introducere.

Se considera ca o problema importanta in seismologie o constituie generarea si propagarea undelor seismice. Astfel putem avea informatii despre procesele ce se produc in regiunea focala, despre natura si structura interiorului Pamantului si despre efectele acestor unde seismice la suprafata Pamantului. Problemele de acest tip isi au originea in lucrarile clasice ale lui Rayleigh, Lamb si Love. [1]-[3] Intr-un model simplificat, Pamantului poate fi privit ca un semi-spatiu elastic si izotrop marignit de o suprafata plana, iar sursele seismice localizate sub aceasta suprafata. Pentru distante suficient de mari localizarea spatiaa a surselor seismice poate fi reprezentata prin functii de tip δ -impuls, sau prin derivatele lor (surse punctuale). Reprezentarea de tip cuplu dublu a surselor punctelor prin intemediul tensorului moment seismic a devenit folosita inca din prima jumătate a secolului XX. [4]-[17]

In aceasta etapa vom reformula modelul de sursa seismica si modul introducere a momentului seismic apeland la interpretarea de torc mecanic, si vom introduce un model de sursa volumica ce tine cont de presiunea exercitata intr-o cavitate sferica de dimensiuni mici in care sursa este localizata.

Ecuatia undelor elastice cu surse (punctuale) localizate este discutata aici pentru un semi-spatiu izotrop marginit de o suprafata plana. O atentie speciala este acordata conditiilor la limita (puse, de obicei, la suprafata considerata libera). Problema undelor seismice cu conditii la limita este o problema standard de vibratii (oscilatii) ale Pamantului, considerat ca o sfera elastica. Undele seismice produse de o suprafata sufera reflexii multiple la suprafata Pamantului (sau la interfetele straturilor interioare ale Pamantului) iar regimul stationar de oscilatii se instaleaza intr-un interval de timp finit. **Marimea (durata) relevanta a acestui interval de timp este de ordinul R/c** , unde R este raza Pamantului iar c este viteza undelor seismice. **Pentru $R=6370$ km si o viteza medie $c=5$ km/s a undelor se obtine $R/c\sim 1274$ s**; acest interval de timp este mult mai mare decit timpul necesar undelor seismice sa se propage din sursa seismica la suprafata Pamantului.

Se deduce ca efectele undelor seismice la suprafata Pamantului se simt intr-un timp mult mai scurt decit timpul necesar pentru atingerea acestui regim stationar de vibratii. Prin urmare ne intereseaza in primul rind acest regim tranzitoriu al undelor, in care conditiile la limita sint practic de fapt conditii de radiatie, iar Pamantul considerat aproximativ o sfera poate fi aproximat local printr-un semi-spatiu elastic. In aceste circumstante, intr-o prima aproximatie, solutia consta in unde sferice P si S (tip dublu-soc) generate de impulsuri temporale si spatiale de tip δ ale sursei de tip falie; o sursa de volum produce bineinteles doar unde P. Pentru sursele cu extensie temporala si spatiaa finite (sau pentru surse multiple) se poate discuta necesitate introducerii unui factor de structura regional, ce poate fi privit ca o „amprenta” a regiunii focale in seismogramele inregistrate.

Prin urmare problema ecuatiei undelor elastice cu surse pentru un semi-spatiu marginit de o suprafata plana va fi tratata cu includerea conditiilor la limita (pentru aceasta suprafata libera). Aceasta ecuatie se preteaza unui regim stationar; **se vor determina solutiile aproximative in camp apropiat pentru sursele seismice ce implica deformari care la rindul lor presupun deplasari cuasi-stactice. Sunt determinate si undele in camp indepartat generate de aceste surse seismice (cu impulsuri de tip δ temporale) pentru regimul tranzitoriu in care distantele relevante sunt suficient de mari comparativ cu ce lungimile de unda. De asemenea se va discuta tot pentru camp indepartat situatia in care undele prezinta regim stationar.**

2. Surse seismice.

Cel mai adesea sursele seismice sunt concentrate intr-un volum mic comparativ cu distantele relevante, care este focarul seismic. Dimensiunile liniare ale acestor regiuni de sursa sunt mult mai mici decat lungimile de unde si distantele de interes, astfel incat ele pot fi vazute drept surse punctuale, intr-o prima aproximatie. Intr-o reprezentare simplista a sursei de tip falie, alunecarea pe falie si forta asociata apar, in timpul unui cutremur de-a lungul unei directii, pe suprafata faliei, si cu o orientare arbitrara. O reprezentare schematica a distributiei de forta intr-o sursa de tip falie este in Figura 1.

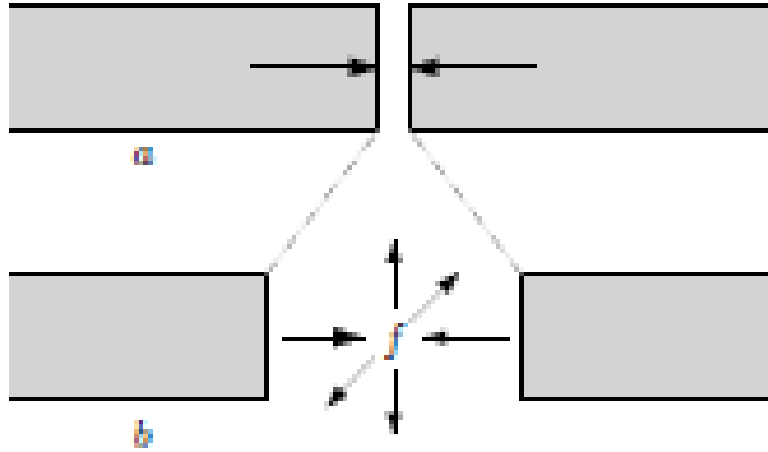


Figure 1: The load accumulation in two elements of tectonic plates in (quasi-) equilibrium (a) may lead to a resistance loss and a localized active focal region f (b).

Momentul fh_j este generalizat la un tensor simetric M_{ij} care este momentul seismic; in plus, distributia $g(\mathbf{R})$ este inlocuita prin $\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)$, unde δ reprezinta functia Dirac localizata intr-un punct prin vectorul de pozitie \mathbf{R}_0 . Astfel se obtine densitatea de forta tensoriala data de ecuatie (2). In continuare vom prezenta o estimare numerica a lungimii de localizare l a regiunii focale. Mentionam intai ca momentul seismic M are dimensiune de lucru mecanic (energie); atunci putem admite rezonabil ca aceasta energie este cheltuita pentru a distruge consistenta elastica a materialului care este rupt in volumul focal V in timpul cutremurului; aceasta densitate de energie este de ordinul densitatii de energie elastica a materialului ρc^2 , unde ρ este densitatea materialului iar c este valoarea medie a vitezei undelor elastice. Prin urmare egalitatea $M/V \cong \rho c^2$ este valabila. Pentru $M=10^{26} \text{ dyn}\cdot\text{cm}$ (corespunzatoare unui cutremur cu magnitudine $M_w=7$ (folosind si relatia $\lg M=1.5M_w+16.1$), $\rho=5\text{g}/\text{cm}^3$ pentru densitatea medie a Pamantului si $c=5\text{km}/\text{s}$ pentru valoarea medie a vitezei undelor elastice se obtine un volum $V=8\times 10^{13}\text{cm}^3$ a regiunii focale si o lungime de localizare $l=V^{1/3}\cong 1\text{km}$. Aceasta incertitudine spatiala duce la o incertitudine temporala pentru undele sferice de ordinul $T=l/c=0.2\text{s}$ (pentru o viteza medie $c=5 \text{ km/s}$).

3.Ecuatia undelor elastice. Consideram ecuatie undelor elastice in forma [22]

$$\ddot{\mathbf{u}} - c_t^2 \Delta \mathbf{u} - (c_l^2 - c_t^2) \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (1)$$

unde \mathbf{u} este deplasarea, $c_{l,t}$ sunt vitezele undelor „longitudinale si respectiv „transversale” iar \mathbf{F} este forta pe unitatea de masa.

Se obtin solutiile:

$$\mathbf{u} = \frac{i}{2\kappa_t c_t^2} S_2 - \frac{i(1-\eta)}{4\kappa_t \kappa_l c_t^2} \mathbf{k} S_3 - \frac{i(1-\eta)}{2\eta \kappa_t} \mathbf{k} A \left(\frac{2\kappa_t}{\kappa_t^2 - \kappa_l^2} e^{i\kappa_l |z|} - \frac{1}{\kappa_t - \kappa_l} e^{i\kappa_t |z|} \right), \quad (2)$$

$$v = \frac{i}{2\kappa_t c_t^2} S_4 - \frac{1-\eta}{4\kappa_t \kappa_l c_t^2} S_5 + \frac{i(1-\eta)}{2\eta \kappa_t} k_l A \left(\frac{2\kappa_t}{\kappa_t^2 - \kappa_l^2} e^{i\kappa_l |z|} - \frac{1}{\kappa_t - \kappa_l} e^{i\kappa_t |z|} \right) + B e^{i\kappa_t |z|}$$

unde

$$S_2 = \int dz' e^{i\kappa_t |z-z'|} \mathbf{F}_{xy}(z'), \quad S_3 = \int dz' e^{i\kappa_t |z-z'|} S_1(z') \quad (3)$$

$$S_4 = \int dz' e^{i\kappa_t |z-z'|} F_z(z'), \quad S_5 = \int dz' e^{i\kappa_t |z-z'|} S_1'(z')$$

$\omega^2 = c_t^2(k^2 + \kappa_t^2)$ si $\eta = c_t^2/c_l^2$; este suficient sa includem o solutie libera de forma $B e^{i\kappa_t |z|}$ in v .

Avand si solutiile pentru coeficientii A si B acest sistem de ecuatii deplasarea in semi-spatiu este complet determinata. Desi aproape impracticabila, solutia ecuatiei undelor elastice este redusa la cuadraturi prin intermediul ecuatiilor de mai sus.

4.Aproximatia de camp apropiat. In camp apropiat, sau in aproximatia cuasi-statica, putem lua $\omega^2/c_{t,l}^2 \cong 0$ si obtinem $\kappa_{t,l} \cong ik$; in acest caz undele pe directia z sunt amortizate (dependenta de z a undelor este dampata). Deplasarea pentru o **sursa de tip falie verticala** in forma:

$$\mathbf{u} = \frac{m(t)(1-\eta)}{4\pi c^2} \left(\frac{1}{R_1^3} + \frac{\eta-2a}{4\eta} \cdot \frac{1}{R_2^3} \right) \mathbf{r} \quad (4)$$

$$v = \frac{m(t)}{4\pi c^2} \left(-\eta \frac{z-z_0}{R_1^3} + \frac{2a(1-\eta) + 8\eta b - \eta(1-\eta)}{4\eta} \cdot \frac{|z-z_0|}{R_2^3} \right)$$

unde $R_{1,2} = [r^2 + (z \mp z_0)^2]^{1/2}$. Pe suprafata $z=0$ deplasarea este data de

$$\mathbf{u}^0 = \frac{m(t)}{4\pi c^2} \cdot \frac{(1-\eta)(5\eta-2a)}{4\eta} \cdot \frac{\mathbf{r}}{R_0^3},$$

$$v^0 = \frac{m(t)}{4\pi c^2} \cdot \frac{2a(1-\eta) + 8\eta b - \eta(1-5\eta)}{4\eta} \cdot \frac{|z_0|}{R_0^3}$$

unde $R_0 = (r^2 + z_0^2)^{1/2}$; se poate observa ca valorile maxime ale deplasarii sunt de ordinul $m/c^2 z_0^2$ ce se ating pentru $r \cong |z_0|/\sqrt{2}$ in cazul deplasarii orizontale si pentru $r=0$ in cazul deplasarii verticale. Trebuie specificat ca am extins integrarea dupa frecventa ω la infinit in ecuatiile (4), desi am aproximat ω mici.

Analog pentru o sursa de tip falie orizontala, deplasarea la suprafata $z=0$ ne intereseaza in mod special. Pentru $z=0$ si $r \ll |z_0|$ deplasarea corespunzatoare este

$$\mathbf{u}^0 \cong \frac{m(t)}{32\pi(1-\eta)c^2|z_0|^3} \cdot [(9-18\eta+\eta^2)(\mathbf{r}\mathbf{n})\mathbf{n} + (1-10\eta+\eta^2)\mathbf{r}], \quad (5)$$

$$v^0 \cong -\frac{m(t)}{64\pi c^2 z_0^2} \cdot \frac{1+10\eta-3\eta^2}{1-\eta} \cdot \left[1 - \frac{3r^2}{z_0^2} - \frac{(\mathbf{nr})^2}{2z_0^2} \right]$$

Se poate vedea ca deplasarea orizontala are o valoare maxima $\cong m/c^2 z_0^2$ pentru r de ordinul $|z_0|$, in timp ce deplasarea verticala scade la zero de la valoarea sa maxima $\cong m/c^2 z_0^2$ atinsa in origine.

5.Forta pe suprafata. Vom calcula si deplasarea produsa de o forta \mathbf{f} localizata pe suprafata $z=0$; in conditiile la limita introducem $\mathbf{P} = \mathbf{f}\delta(\mathbf{r})$ (unde \mathbf{f} este impartita la densitate). Pentru variatii mici in timp ($\omega \cong 0$) se poate folosi aproximatia in camp apropiat (cuasi-statica) $\kappa_{t,l} \cong ik$; ecuatiile (4) ne dau deplasările

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\frac{1}{2c_t^2(1-\eta)} \left[\frac{\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{f}_{xy})}{k^3} - i\eta f_z \frac{\mathbf{k}}{k^2} \right] e^{-k|z|} \\ v &= \frac{1}{2c_t^2(1-\eta)} \left(\frac{3-2\eta}{2} \frac{i\mathbf{k}\mathbf{f}_{xy}}{k^2} + \eta f_z \frac{1}{k} \right) e^{-k|z|} \end{aligned} \quad (6)$$

Componenta orizontala (din transformata Fourier) este data de

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{4\pi c_t^2(1-\eta)} \left[I_6 + \eta f_z \frac{\mathbf{r}}{R(R+|z|)} \right]$$

unde

$$I_6 = \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{k} \frac{\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{f}_{xy})}{k^3} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} e^{-k|z|}$$

Datorita faptului ca

$$\frac{\partial I_6}{\partial |z|} = i \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} I_5 = -2 \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\mathbf{f}_{xy}\mathbf{r}}{R(R+|z|)}$$

prin integrare putem gasi I_6 (pe suprafata $I_6 \cong \frac{\mathbf{f}_{xy}}{r}$, $(\mathbf{f}_{xy}\mathbf{r})\mathbf{r}/r^3$). Astfel putem vedea ca deplasarea pe suprafata este de ordinul $f/c_t^2 r$.

Rezultate de mai sus in camp apropiat sunt similare cu probleme de deplasare statica pentru un semi-spatiu elastic izotrop cu o forta punctuala interna sau externa, pina la factori numerici in amplitudini (asa numitele probleme Boussinesq si Mindlin), [23]-[34] desi aproximatia in camp apropiat folosita aici nu este in intregime controlabila daca se aplica in cazul deplasarii statice.

6.Regimul tranzitoriu.

Daca lungimile de unde sunt mult mai mici decat distantele de interes suntem in regimul de camp indepartat. Se poate intimpla in acest caz ca sursele de unde sa isi inceteze activitatea cu mult timp inainte ca undele sa atinga suprafata semi-spatiului. In acest caz sintem in regimul tranzitoriu, si ecuatia undelor poate fi tratata atunci ca intr-un solid infinit, iar conditiile la limita pot fi neglijate (ele sunt incluse cind undele sufera reflexii si refractii la suprafata). Pentru o sursa de tip falie reprezentata prin

$$\mathbf{F}(\mathbf{R}, t) = m(t)n_i \partial_i \delta(\mathbf{R}) \mathbf{n}$$

iar deplasarea totala se obtine ca fiind

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & \frac{mTt}{4\pi} (\mathbf{ngrad})^2 grad \cdot \left[\frac{1}{R} \theta(R - c_t t) + \frac{1}{c_t t} \theta(c_t t - R) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{R} \theta(R - c_l t) - - \frac{1}{c_l t} \theta(c_l t - R) \right] - \\ & - \frac{mTt}{4\pi} \mathbf{n}(\mathbf{ngrad}) \Delta \left[\frac{1}{R} \theta(R - c_t t) + \frac{1}{c_t t} \theta(c_t t - R) \right] \end{aligned}$$

Pentru contributia in camp apropiat ne limitam aici doar la partile continue in timp (proportionale cu functiile θ); ea este data de relatia:

$$\mathbf{u}_n = \frac{mTt}{4\pi} (\mathbf{ngrad})^2 (grad \frac{1}{R}) [\theta(R - c_t t) - \theta(R - c_l t)] \quad (7)$$

si constituie rezultatul cuplului dublu. Deplasarea in camp departat este:

$$\mathbf{u}_f = \frac{mT}{4\pi} \frac{(\mathbf{nR})^2}{c_l R^4} \mathbf{R} \delta'(R - c_l t) + \frac{mT}{4\pi} \frac{\mathbf{nR}}{c_t R^2} \left[\mathbf{n} - \frac{(\mathbf{nR})\mathbf{R}}{R^2} \right] \delta'(R - c_t t) \quad (8)$$

Trebuie specificat ca deplasarea in camp indepartat data de ecuatia (8) este deplasarea in camp indepartat data de modelul cuplul dublu (precizam ca $\delta'(R - c_t t) = (1/c^2) \delta'(t - R/c)$). In general, modelul de cuplu-dublu este obtinut inlocuind m_{ij} in ecuatia (76) prin parametrii m_{ij} . Ordinul de marime al deplasarii in camp indepartat asa cum rezulta din relatiile de mai sus este $u_f \cong mT/cRl^2$; pentru un moment seismic $M=10^{26} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ (corespunzator magnitudinii $M_w=7$ si unei densitati $\rho=5 \text{ g/cm}^3$), viteza $c=5 \text{ km/s}$, distanta $R=100 \text{ km}$, lungime de localizare $l=5 \text{ km}$ si durata $T=10 \text{ s}$ obtinem $u_f \cong 1 \text{ m}$. Densitatea de flux de energie pentru o unda scalara u este $S = -\rho c^2 \dot{u} grad u$; pentru deplasarea in camp indepartat obtinuta aici vom avea $S \cong \rho c m^2 T^2 / R^2 l^6$; folosind aceleasi valori numerice de mai sus obtinem $S \cong 5 \times 10^4 \text{ w/cm}^2$.

7. Aproximatia de camp indepartat (regiunea undelor).

In cazul in care durata T de actiune a sursei seismice este foarte scurta, atunci poate fi aproximata printr-un impuls de tip δ de timp iar continutul de frecvente se extinde de la zero la valori mari $\Delta\omega = 2\pi/T$; in acest caz, lungimile de unda se extind de la valori de lungimi scurte $\frac{2\pi c_t l}{\Delta\omega} = c_t l/T$ la infinit. De exemplu, daca $T=1 \text{ s}$ lungimile de unda corespunzatoare sunt de ordinul $5 \text{ km/s} \cdot 1 \text{ s} = 5 \text{ km}$ (pentru o viteza medie de 5 km/s). Aceste lungimi de unda sunt mai scrute decit distantele de interes, si, pentru o buna portiune a spectrului, exista unde care se propaga in interiorul solidului. Aceasta este regiunea undelor, sau aproximatia de camp indepartat.

Undele elastice includ unde dilatationale, descrise de divergenta deplasarii $D = \text{div} \mathbf{u}$ si guvernate de termenul sursa S_1 , ce se propaga cu viteza c_l ; de asemenea mai includ unde ce caracterizeaza deplasarea descrise de deplasariile \mathbf{u} si \mathbf{v} , generate atat de sursele localizate S_2 si S_4 , cat si de sursele delocalizate S_3 si S_5 , ce implica derivate ale undelor dilatationale; prezenta acestor surse delocalizate complica destul de mult solutia ecuatiei undelor elastice. Sursele delocalizate se comporta ca si cum ar fi o „interactie” intre undele dilatationale ce se propaga cu viteza c_l si unde ce se propaga cu vitezele c_t , si in care c_l sunt surse pentru undele caracterizate de viteza c_t . In acest caz putem sa nu mai tinem cont de contributiile cuasi-stactice. Prin urmare, daca fixam $\kappa_l = \kappa_t = \kappa$, $c_t = c$ si pastram $\eta \neq 1$ in ecuatiile de miscare acestea vor deveni:

$$\mathbf{u} \cong \frac{i}{2c^2\kappa} \mathbf{S}_2 - \frac{i(1-\eta)}{4c^2\kappa^2} \mathbf{k} S_3 - \frac{i(1-\eta)}{4\eta\kappa^2} \mathbf{k} A e^{i\kappa|z|} \quad (83)$$

$$v \cong \frac{i}{2c^2\kappa} \mathbf{S}_4 - \frac{1-\eta}{4c^2\kappa^2} S_3 + \left[\frac{i(1-\eta)}{4\eta\kappa} A + B \right] e^{i\kappa|z|}$$

Aproximatia descrisa mai sus ne da numai tipul undelor ($\kappa_l = \kappa_t = \kappa$) si afecteaza coeficientii numerici. Trebuie specificat ca in cadrul acestei aproximatii $\kappa_l = \kappa_t = \kappa$ cu pastrarea relatiei $\eta \neq 1$ face dificila evaluarea validitatii rezultatelor.

7.1 Unde generate de o sursa de tip falie verticala. Termenii sursa pentru o falie verticala sunt preluati din ecuatiile pentru camp apropiat. Se poate observa ca deplasarea contine derivatele a doua unde sferice, una generata direct de sursa, cealalta generata de imaginea sursei, cu marimea de ordinul $(mT/cl^2)\mathbf{R}/R^2$, in care l este lungimea de localizare a functiei δ . Pe suprafata $z=0$ acest unde sunt:

$$\mathbf{u}^0 \cong \frac{mT}{8\pi c^3} (5-\eta) \frac{\mathbf{r}}{R_0^2} \delta' \left(t - \frac{R_0}{c} \right), \quad v^0 \cong -\frac{mT}{2\pi c^3} \frac{|z_0|}{R_0^2} \delta' \left(t - \frac{R_0}{c} \right) \quad (90)$$

in care $R_0 = (r^2 + z_0^2)^{1/2}$. Mai trebuie precizat ca deplasarea orizonatala are o valoare maxima la distante r de ordinul $|z_0|$. Pentru un moment seismic $M=10^{26} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ (corespunzator magnitudinii $M_w=7$), o densitate $\rho=5 \text{ g/cm}^3$, viteza medie $c=5 \text{ km/s}$, durata $T=10 \text{ s}$, adancime $|z_0|=100 \text{ km}$ si lungime de localizare $l=5 \text{ km}$ (localizare a functiei δ) obtinem o deplasare de ordinul 1 m . Prezenta derivatelor functiei δ in deplasare este o consecinta a prezentei suprafetei.

De asemenea se observa ca componenta undei ce contine $|z - z_0|$ la exponent in ecuatiile ce dau transformatele Fourier poate fi privita ca o unda incidenta la suprafata $z=0$, in timp ce unda ce contine componenta $|z + z_0|$ la exponent est eo unda reflectata. Oricum insa, pentru $z < z_0$ undele ce contin $|z - z_0|$ se propaga in directie opusa, fiind unde reflectate. De fapt ambele sunt unde sferice (sau derivate spatiale ale undelor sferice), si o separare a lor in unde „longitudinale” si ”transversale” are doar un caracter limitativ si nu este convenabil. Aceasta este situatia generala ce se datoreaza atat prezentei suprafetei libere la $z=0$ cat si caracterului directional al sursei undelor.

Analog pentru **unde generate de o sursa de tip falie orizontala**, in care vom folosi termenii sursa dati de ecuatiile de la capitolele precedente:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &\cong -\frac{m(\omega)}{4\pi c^2} \mathbf{n} \cdot \left(-i\mathbf{n} \frac{\partial}{\partial r} \right) \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{k} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} e^{i\kappa|z-z_0|} \\ &\quad - \frac{m(\omega)}{4\pi c^2} \left(-i \frac{\partial}{\partial r} \right) \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{k} \frac{e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} (\mathbf{k}\mathbf{n})^2}{\kappa k^2} e^{i\kappa|z+z_0|} \\ v &\cong \frac{m(\omega)}{4\pi c^2} \left(-i \frac{\partial}{\partial |z+z_0|} \right) \frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{k} \frac{e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} (\mathbf{k}\mathbf{n})^2}{\kappa k^2} e^{i\kappa|z+z_0|} \end{aligned} \quad (93)$$

Prima integrala din expresia pentru \mathbf{u} de mai sus este I_0 si se obtine pentru $z \rightarrow z - z_0$. A doua integrala ce apare poate fi calculata folosind functiile Bessel si o parametrizare unghiulara a vectorilor $\mathbf{k} = k(\cos\varphi, \sin\varphi)$, $\mathbf{r} = r(\cos\alpha, \sin\alpha)$ si $\mathbf{n} = (\cos\beta, \sin\beta)$. Obtinem astfel deplasarea

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &\cong -\frac{mT}{4\pi c^3} \mathbf{n} \frac{nr}{R_1^2} \delta' \left(t - R_1/c \right) + \frac{mT}{4\pi c^3} \left[1 - \frac{(\mathbf{rn})^2}{r^2} \right] \frac{\mathbf{r}}{R_2^2} \delta' \left(t - R_2/c \right), \\ v &\cong -\frac{mT}{4\pi c^3} \left[1 - \frac{(\mathbf{rn})^2}{r^2} \right] \frac{|z + z_0|}{R_2^2} \delta' \left(t - R_2/c \right) \end{aligned} \quad (96)$$

Se poate observa ca deplasarea cauzata de o sursa de tip falie orizonatala contine derivatele a doua unde sferice, una ce vine direct din sursa (cu exceptia componentei verticale a deplasarii), si alta corespunzatoare imaginii sursei, cu o dependenta specifica unghiulara generata de caracterul direcional a sursei de tip falie orizontala.

7.2 Unde generate de surse volumice. O sursa volumica este caracterizata de fortele $\mathbf{F}_{xy} = p(t) \frac{\mathbf{r}}{R_1} \theta(a - R_1)$, $F_z = p(t) \frac{z-z_0}{R_1} \theta(a - R_1)$. In cadrul aproximatiei folosite aici de valori mici ale lui $\Delta\kappa$, folosind ecuatiile (83) si conditiile la limita obtinem deplasarea

$$\mathbf{u} \cong -\frac{2\pi i p(\omega) a^3}{c^2} (1 - \eta) \frac{\mathbf{k}}{\kappa^2} [e^{i\kappa|z-z_0|} + e^{i\kappa|z+z_0|}],$$

$$v \cong \frac{4\pi i p(\omega) a^3}{c^2} (1 - \eta) \frac{1}{\kappa^2} e^{i\kappa|z+z_0|}$$

Pentru un impuls de tip δ in timp $p(t) = pT \delta(t)$ transformata Fourier inversa a componentei verticale se obtine in mod direct ca o unda sferica:

$$v \cong \frac{2pT a^3}{c^2} (1 - \eta) \frac{\delta(t - R_2/c)}{R_2}$$

generata de sursa imagine, in care $R_2 = [r^2 + (z + z_0)^2]^{1/2}$. Pentru componenta orizontala folosim si $\int d|z \mp z_0| \frac{\partial}{\partial|z \mp z_0|}$ in transformata Fourier inversa; obtinem astfel unde bi-dimensionale

$$\mathbf{u} \cong -\frac{pT a^3}{c} (1 - \eta) \left[\frac{\mathbf{r}_-}{(c^2 t^2 - r_-^2)^{3/2}} + \frac{\mathbf{r}_+}{(c^2 t^2 - r_+^2)^{3/2}} \right] \quad (100)$$

unde $r_{\pm} = [c^2 t^2 - (z \pm z_0)^2]^{1/2}$ pentru $r_{\pm} < ct$ si zero in rest.

La suprafata $z=0$ componenta orizontala a deplasarii este:

$$\mathbf{u}^0 \cong -\frac{2pT a^3}{c} (1 - \eta) \left[\frac{\mathbf{r}}{(c^2 t^2 - r^2)^{3/2}} \right] \quad (101)$$

O astfel de unda bi-dimensionala (sau mai degraba conica) care nu se anuleaza in spatele frontului de unda (spre deosebire de undele sferice, care sunt nenule doar pe o suprafata sferica) face deosebire dintre sursa volumica (caracterizeaza sursa volumica) si cea de tip falie. Mai trebuie precizat ca singularitatea frontului de unda din ecuatia (101) pentru $r=ct$ este de fapt netezita de incertitudinea in dimensiunea a liniara a sursei „punctiforme”, astfel incat numitorul $(c^2 t^2 - r^2)^{3/2}$ trebuie privit ca $(ra)^{3/2}$.

De asemenea se observa ca generalizarea momentului seismic m_{ij} este limitata la modul de tratare a undelor elastice descris mai sus, in care am folosit separarea in componente orizontale si verticale.

Referinte

1. Lord Rayleigh, "On waves propagated along the plane surface of an elastic solid", Proc. London Math. Soc. 17 4-11 (1885) (J. W. Strutt, Baron Rayleigh, Scientific Papers, vol.2, 441-447, Cambridge University Press, London (1900)).
2. H. Lamb, "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid", Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A203 1-42 (1904).
3. A. E. H. Love, Some Problems of Geodynamics, Cambridge University Press, London (1926).
4. H. Nakano, "Notes on the nature of the forces which give rise to the earthquake motions", Seism. Bull. Central Meteorological Observatory of Japan 1 92-120 (1923).
5. H. Honda, "Earthquake mechanism and seismic waves", J. Phys. Earth 10 1-98 (1962).
6. R. Burridge and L. Knopoff, "Body force equivalents for seismic dislocations", Bull. Seism. Soc. Am. 54 1875-1888 (1964).
7. J. D. Eshelby, "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems", Proc. Roy. Soc. London A241 376-396 (1957).
8. L. R. Sykes, "Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges", J. Geophys. Res. 72 2131-2153 (1967).
9. T. Maruyama, "On force equivalents of dynamic elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism", Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 41 467-486 (1963).
10. A. Ben Menahem, "Radiation of seismic surface waves from finite moving sources", Bull. Seism. Soc. Am. 51 401-435 (1961).
11. A. Ben Menahem, "Radiation of seismic body waves from finite moving sources", J. Geophys. Res. 67 345-350 (1962).
12. N. A. Haskell, "Total energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults", Bull. Seism. Soc. Am. 54 1811-1841 (1964).
13. N. A. Haskell, "Total energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults". Part II., Bull. Seism. Soc. Am. 56 125-140 (1966).
14. J. N. Brune, "Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones", J. Geophys. Res. 73 777-784 (1968).
15. G. Backus and M. Mulcahy, "Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. I. Continuous displacements", Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 46 341-361 (1976).
16. G. Backus and M. Mulcahy, "Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. II. Discontinuous displacements", Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 47 301-329 (1976).
17. B. V. Kostrov and S. Das, Principles of Earthquake Source Mechanics, Cambridge University Press, NY (1988).
18. K. Aki and P. G. Richards, Quantitative Seismology, University Science Books, Sausalito, CA (2009).
19. R. Madariaga, "Seismic Source Theory", in Treatise of Geophysics, vol. 4, Earthquake Seismology, ed. H. Kanamori, Elsevier (2015).
20. L. Knopoff, "Diffraction of elastic waves", J. Acoust. Soc. Am. 28 217-229 (1956).
21. A. T. de Hoop, "Representation theorems for the displacement in an elastic solid and their applications to elastodynamic diffraction theory", D. Sc. Thesis, Technische Hogeschool, Delft (1958).
22. L. Landau and E. Lifshitz, Course of Theoretical Physics, vol. 7, Theory of Elasticity, Elsevier, Oxford (1986).
23. J. V. Boussinesq, Applications des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques, Gauthier-Villars, Paris (1885).
24. A. Sommerfeld, Vorlesungen uber Theoretische Physik, Bd. II, Mechanik der deformierbaren Medien, Akad. Verlag., Leipzig (1970).
25. A. I. Lurie, Spatial Problems in the Theorie of Elasticity (in Russian), Gostehizdat, Moscow (1955).

- 26.J. Dougall, "A general method of solving the equations of elasticity", Proc. Edinburgh Math. Soc. 16 82-98 (1897).
- 27.E. Melan, "Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft in Innern beanspruchten Halbscheibe", Z. Angew. Math. Mech. 12 343-346 (1932) (correction Z. Angew. Math. Mech. 20 368 (1940)).
- 28.R. Mindlin, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", Physics 7 195-202 (1936).
- 29.R. Mindlin, "Note on the Galerkin and Papkovitch stress functions", Bull. Am. Math. Soc. 42 373-376 (1936).
- 30.R. Mindlin, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", Tech. Note #8, Columbia Univ. (1953).
- 31.G. D. Grodskii, "Integration of general equations of equilibrium of an isotropic elastic body by means of Newtonian potentials and harmonic functions" (in Russian), Izv. Akad. Nauk SSSR, Mat. Estestv. Nauk, 4 587-614 (1935).
- 32.H. Neuber, "Ein neuer Ansatz zur Losung raumlicher Probleme der Elastizitatstheorie. Der Hohlkegel unter Einzellast als Beispiel", Z. Angew. Math. Mech. 14 203-212 (1934).
- 33.P. F. Papkovitch, "A review of some general solutions of basic differential equations of rest for an isotropic elastic body" (in Russian), PPM (Appl. Math. Mech) 1 117-132 (1937).
- 34.L. Rongved, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid with fixed boundary", J. Appl. Mech. 22 545-546 (1955).

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului (se vor preciza stadiul de implementare a proiectului, gradul de indeplinire a obiectivului cu referire la tintele stabilite si indicatorii asociati pentru monitorizare si evaluare).

Rezultate: s-a realizat reformularea reprezentării unei surse seismice de tip cuplu-dublu pornind de la interpretarea clasică de tip cuplu mecanic a tensorului moment seismic. Undele seismice rezultate sunt discutate incluzând condițiile la limita, ecuațiile undelor sunt reduse la cuadraturi folosindu-se transformate Fourier în plan. Se obține soluția pentru ecuația unei seismice într-un semi-spațiu elastic și izotrop în regim tranzitoriu în doi pași: pentru unde sferice primare, și pentru unde secundare generate de undele primare prin interacția lor cu suprafața. În continuare aproximația de câmp apropiat este folosită pentru a obține soluții pentru deformările cuasistatice, incluzând deplasarea cauzată de o forță localizată ce acționează pe suprafața, iar regimul tranzitoriu de câmp îndepărtat este discutat, pentru sursa seismică de tip impuls temporal introdusă aici. De asemenea este prezentată și aproximația pentru ecuațiile undelor în câmp îndepărtat.

Stadiul realizării obiectivului fazei: Astfel, în cadrul identificării undelor seismice locale și studiului proceselor de interacție ce au loc în locațiile de interes, în scopul evaluării riscului seismic, **obiectivul acestei faze a fost realizat integral**. La nivelul etapei actuale (întai) **implementarea proiectului constă în indeplinirea tintelor propuse** în cadrul obiectivului stabilit, prin identificarea elementelor fizice în dinamica sistemului sol-structură date de caracteristicile amplasamentelor prin considerarea nivelului de solicitare indus de mișcarea seismică a terenului în timpul cutremurelor puternice, cât și prin determinarea mai exactă a efectelor seismice ținând cont de legile fizico-mecanice ale rocilor, fenomen specific întâlnit în mediile traversate de unde seismice produse de cutremure puternice ce produc deplasări mari. Rezultatele obținute vin în sprijinul implementării procedurii generale de modelare a procesului seismic, ce are un rol important la evaluarea hazardului seismic local (microzonare efectivă), prin calculul cât mai exact al marimilor ce pot produc pagube importante la suprafața, contribuind la reducerea efectelor seismice locale ce induc un risc ridicat. Astfel unul din scopurile urmărite l-a reprezentat **estimarea deformatiilor și a efectelor la suprafața ale propagării undelor seismice**.

Concluzii:

În cadrul acestei etape s-au studiat efectele undelor seismice la suprafața Pământului, cu posibila aplicabilitate la zonele ce contin structuri construite, efecte considerate elemente de interes major în evaluarea riscului seismic. În mod traditional, aceste efecte se studiaza în cadrul identificării și propagării undelor seismice locale și a proceselor de interacție ce au loc în locatiile de interes. Insa o problema o reprezinta lipsa de cunoastere suficienta a proprietatilor mediului din partea inferioara a crustei terestre, zona pe care unele seismice o parcurg pe traseul sursa-stratele superioare ale locatiilor de interes. Modele de propagare dezvoltate pentru undele seismice, precum si estimarea efectelor acestora la suprafata Pamantului sint folosite la calcularea/masurarea deformatiilor si deplasarilor crustei. Metode implementate sunt specific seismologice, geotehnice, fizice si matematice, si evalueaza factorii care contribuie la riscul seismic pe teritoriul Romaniei pentru a asigura cresterea rezilientei societatii umane la cutremure. Ecuatia undelor elastice si conditiile la limita sunt introduse de o maniera convenabila pentru cazul unui semi-spatiu elastic izotrop folosind si transformările Fourier in-plan (orizontale). S-a demonstrat ca undele dilatationale se comporta ca sursa pentru undele „transversale”. In acest fel problema undelor elastice in semi-spatiu este redusa la cuadraturi, cel putin la nivel principial. Aproximatiile de camp apropiat (cuasi-stactice) sunt rezolvate explicit pentru toate tipurile de surse introduse aici, inclusiv pentru deplasarea produsa de o forta localizata ce actioneaza pe suprafata. Inclusiv regimul tranzitoriu de camp indepartat este tratat si rezolvat pentru ambele tipuri de surse prezentate. S-au realizat aceleasi evaluari si calcule inclusiv considerand aproximatia de camp indepartat pentru asa numita „zona a undelor”.

Propuneri de continuare si indicatori asociati:

In cadrul acestei etape s-au obtinut informatii specifice, aprofundate, riguroase, fundamentate tehnico-stiintific, cu un grad ridicat de confidenta, asa cum si-a propus prezentul proiect, precum si organizarea acestor date intr-un sistem convenabil din punct de vedere conventional informatic si tehnologic in vederea implementarii rezultatelor aferente, toate acestea constituid un factor important de valoare adaugata a cercetarii stiintifice aplicative. Deoarece obiectivul a fost indeplinit integral si tintele propuse atinse, propunem continuarea desfasurarii proiectului.

Indicatori asociati:

Rezultate din cadrul acestei etape au fost acceptate in cadrul a doua conferinte stiintifice internationale, una in tara, cealalta in strainatate, ce urmeaza a avea loc in acest an, dupa cum urmeaza:

-conferinta internationala USAMV Bucuresti, “ANALYSIS IN TERMS OF STRUCTURAL DISPLACEMENT AND ACCELERATIONS FOR SOME TOWER BUILDINGS UNDER MODERATE MAGNITUDE EARTHQUAKES”, autori: Stefan Florin BALAN, Alexandru TIGANESCU, Bogdan Felix APOSTOL.

-19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, “A SHORT SURVEY ON THE BUILDINGS BEHAVIOUR UNDER STRONG SEISMIC MOVEMENTS. CASE STUDY FOR BUCHAREST CITY AREA”, autori: Dr. Ing. Stefan Florin Balan, Dr. Bogdan Felix Apostol, Drd. Alexandru Tiganescu.

De asemenea au fost acceptate spre publicare in cadrul unei reviste stiintifice, cu factor de impact cotata ISI.

Responsabil proiect,
Dr. Iren Adelina Moldovan, CS I

Responsabil etapa,
Dr. Bogdan Apostol, CS I